

УЧРЕЖДЕНИЕ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК
ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ
им. Г.И. Будкера СО РАН
СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ РАН
(ИЯФ СО РАН)

Ю.А. Пупков, М. Кляйн, Д. Томмазини

МОДЕЛИ ДИПОЛЬНЫХ МАГНИТОВ ДЛЯ LHeC, CERN
ИЗ АНИЗОТРОПНОЙ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЙ СТАЛИ

ИЯФ 2011-14

НОВОСИБИРСК
2011

Модели дипольных магнитов для LHeC, CERN из анизотропной электротехнической стали

Ю.А. Пупков (ИЯФ), М. Кляйн (ЦЕРН), Д. Томмазини (ЦЕРН)

Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН,
630090, Новосибирск, Россия

Аннотация

В настоящее время в ЦЕРНе рассматривается проект дополнения Большого адронного коллайдера электронным накопительным кольцом для изучения $e - p$ взаимодействия при энергии электронов 10 – 70 ГэВ. Магниты этого кольца работают при низком уровне поля – 130÷900 Гс. Остаточное намагничивание сердечников может искажать топографию поля. В работе рассмотрены модели магнитов из анизотропной электротехнической стали. Показано, что эта сталь, имеющая малую коэрцитивную силу, позволяет изготовить магниты с качеством поля лучше, чем предъявляемые требования - в диапазоне ± 2 см менее $\pm 2.5 \cdot 10^{-4}$. Предложена конструкция магнита.

Models of dipole magnets for LHeC, CERN, made of grain-oriented electric steel

Yu.A. Pupkov (BINP), Max Klein (CERN), Davide Tommasini CERN)

Budker Institute of Nuclear Physics
630090, Novosibirsk, Russia

Abstract

Currently, they at CERN are discussing the Project of replenishing the Large Hadron Collider with an electron storage ring for the study of the $e-p$ interaction at an electron energy of 10 - 70 GeV. The magnets of this ring are to operate at a low field – 130÷ 900 Gs. The residual magnetization of the cores may distort the field topography. This paper describes magnet models made of grain-oriented grades electric steel. It is shown that this steel, which has a low coercive force, allows fabricating magnets with field quality exceeding the requirements - less than $\pm 2.5 \cdot 10^{-4}$ in the range of ± 2 cm. A design of the magnets is proposed.

1. Цель работы, исходные требования

Цель данной работы – исследования анизотропной электротехнической стали для изготовления дипольных магнитов LHeC с малыми остаточными полями. Исследовано влияние остаточных полей на повторяемость величины и топографии магнитного поля при различных циклах.

Проект LHeC предполагает дополнение Большого адронного коллайдера электронным накопительным кольцом для изучения $e - p$ взаимодействия при энергии электронов 10 – 70 ГэВ [1]. Расположение электронного кольца в тоннеле БАК над его основными магнитами. Диполи должны быть компактными, работать при низком уровне магнитных полей.

Исходные данные взяты из МЕМОРАНДУМА ЦЕРН от 23 июля 2009 [2]:

Магнитное поле при инжекции 0.019 Т; максимальное поле 0.135 Т; область хорошего поля в области ± 20 мм по горизонтали $|\Delta B/B| \leq 10^{-3}$ при инжекции и $|\Delta B/B| \leq 5 \cdot 10^{-4}$ при максимальном поле. Полная свободная апертура магнита не менее 60x35 мм. 736 диполей длиной по 14.736 м.

В августе 2010, после изменений оптики кольца и во время работы с моделями, уровни полей были изменены на 0.0125 Т (125 Гс) и 0.0874 Т (0.874 кГс) соответственно. Количество диполей длиной 5.45 м – 3080 штук [3]. Вероятно, возможны дальнейшие модификации.

2. Проблемы и предлагаемые решения

Изотропные электротехнические стали, применяемые для создания магнитов ускорителей, имеют коэрцитивную силу $\sim 40 \div 120$ А/м (0.5 \div 1.5 Э). Остаточная намагниченность ярма может значительно изменять топографию магнитного поля, см. [4].

Предложено использовать анизотропную электротехническую сталь для создания ярма магнита (сленг – трансформаторная сталь). Эти стали имеют коэрцитивную силу $\sim 5 \div 10$ А/м (0.06 \div 0.125 Э) вдоль направления проката. Поперек направления проката эта величина не нормируется, но значительно больше и может сильно влиять на качество поля. Предложены конструкции магнитов, в которых направление силовых магнитных линий, в

основном, совпадает с направлением проката стального листа. Конструкция с ферритом, дорогим и не конструкционным материалом, представляла только научный интерес, и не моделировалась.

Модель Н-образного магнита также представляла только научный интерес. Конструкция вакуумной камеры, принимающей мощное СИ, требует, чтобы магнит был С-образной формы. Модель С-образного магнита реализована в двух вариантах. Полюсные части были неизменными, а одна сменная замыкающая часть ярма изготовлена с направлением проката вдоль силовых линий, другая – с направлением проката перпендикулярно силовым линиям. Проверена возможность штамповки и сборки ярма магнита из двух, а не из трех частей.

В свою очередь, Н-образный магнит имеет некоторое преимущество перед С-образным, так как в нем отсутствует градиент поля из-за остаточной намагниченности.

На моделях, изготовленных по эскизам, исследовалось изменение топографии поля (изменение качества поля в заданной области) и повторяемость уровня поля при различных циклах. Требуемое качество поля может быть легко получено доработкой шимов, которые были специально изготовлены с припуском для возможных модификаций диполей.

3. Свойства анизотропной электротехнической стали

Для экспериментов применена анизотропная электротехническая сталь 3408 Российского производства. Толщина листа 0.35 мм, покрытие твердое, неорганическое, термостойкое, типа ЭТ. Приводимые в этом разделе данные могут быть использованы при проектировании магнитных элементов. Опыт производства магнитов из подобных сталей пока незначительный.

3.1 Кривые намагничивания

Анизотропные стали (ГОСТ 21427.1-83) марок 3404, 3405, 3406, 3408, 3409, 3411, 3412, 3413, 3414, 3415 отличаюсь незначительно по свойствам, имеют следующие особенности. Они имеют очень большое μ_{\parallel} вдоль направления проката листа, несколько десятков тысяч, малое насыщение при больших В, малые потери в переменном поле. Направление наименьшего намагничивания располагается под углом $\sim 55^{\circ}$ к направлению проката. В таблице 1 для примера приведены кривые намагничивания стали 3405, применяемой в Институте. Исходными были данные из [5].

Формат этих данных адаптирован для ввода в применяемую в Институте программу “MERMAID”.

Таблица 1.

B kGs	Относительная магнитная проницаемость					
	Угол к направлению проката, градусы					
	0°	15°	30°	45°	60°	90°
0	12960	3560	3830	2740	1440	690
0.1	13570	4460	4090	2800	1460	740
0.2	14270	5730	4550	2910	1480	800
0.5	16860	9810	6010	3250	1620	1060
1	22340	14260	7480	3870	2030	1570
2	32900	20510	9890	5230	2970	2500
3	42070	24180	11680	6360	3870	3310
4	49830	26570	12950	7190	4580	4020
5	56170	28460	13890	7920	5120	4710
6	61130	30270	14670	8700	5500	5430
7	64740	32080	15400	9580	5730	6160
8	66950	33720	16050	10360	<u>5770</u>	6830
9	<u>67650</u>	34880	<u>16460</u>	<u>10710</u>	5500	<u>7280</u>
10	66600	<u>35170</u>	16380	10170	4800	7050
11	63560	34210	15510	8430	3640	6480
12	58310	31730	13590	5520	1960	5360
13	50720	27590	10570	2210	80	3490
14	40940	22130	6300	478	12.3	866
15	29500	15940	3030	20.4	7	19.8
16	18450	8000	862	9.3	5.1	9.1
17	7080	2960	28.8	6.2	4.1	6.2
18	1890	558	11.4	4.8	3.5	4.8
19	245.5	24.2	7.4	4	3.1	4
20	26	11.3	5.6	3.5	2.8	3.5
21	12	7.6	4.6	3.1	2.6	3.1
22	8	5.8	4	2.8	2.4	2.8
23	6.1	4.8	3.5	2.6	2.3	2.6
24	5.1	4.2	3.2	2.5	2.2	2.5
25	4.4	3.7	2.9	2.3	2.1	2.3
30	2.8	2.6	2.2	1.9	1.8	1.9

Так как магнитные свойства этих сталей регламентированы ГОСТом до напряженности поля $H = 2500$ А/м (31.25 Э), справочные данные также ограничены этой величиной. Это соответствует $B \sim 15\div 19$ кГс в зависимости от направления проката. Поэтому для корректной экстраполяции зависимости $\mu_{(B)}$ при больших B была использована следующая закономерность (закон приближения к насыщению) [6]:

$$I = I_s (1 - a_1/H - a_2/H^2 - \dots), \quad (1)$$

где I – магнитный момент, I_s – максимальный момент при насыщении, a_1, a_2, \dots – константы, связанные с процессом технического намагничивания. В этой же работе показано, что достаточно ограничиться в (1) первыми двумя членами по H . С учётом того, что:

$$\begin{aligned} B &= H + 4\pi I = H + 4\pi I_s (1 - a_1/H - a_2/H^2), \\ B &= \mu H = H + 4\pi I_s - 4\pi I_s \cdot a_1/H - 4\pi I_s \cdot a_2/H^2, \\ \mu - 1 &= 4\pi I_s / H - 4\pi I_s \cdot a_1/H^2 - 4\pi I_s \cdot a_2/H^3. \end{aligned}$$

Уравнение для μ приведет к виду:

$$\mu - 1 = b_1/H + b_2/H^2 + b_3/H^3 = b_1x + b_2x^2 + b_3x^3, \quad (2)$$

где $x = 1/H$, b_i – константы, определяемые материалом.

Константы b_i вычисляются по методу наименьших квадратов по 4-5 измеренным точкам при H от ~ 300 до 2500 А/м, где железо уже переходит в режим насыщения. Затем экстраполяцией вычисляется μ для больших H и, соответственно, B .

Такой метод сглаживания зависимости $\mu_{(B)}$ применим для любых типов сталей и полезен для случая расчета магнитных элементов, работающих при больших полях.

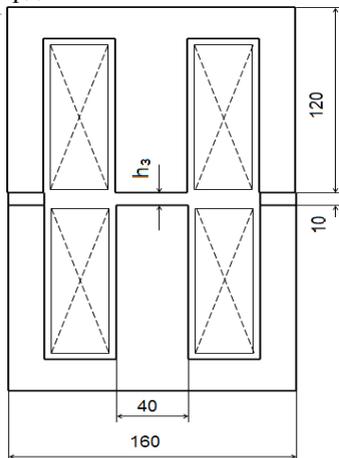
Перечисленные выше анизотропные стали по кривым намагничивания аналогичны 3405, максимальные значения μ отличаются на $\pm 10\%$ в зависимости от сортамента.

3.2 Коэрцитивная сила. Остаточная намагниченность

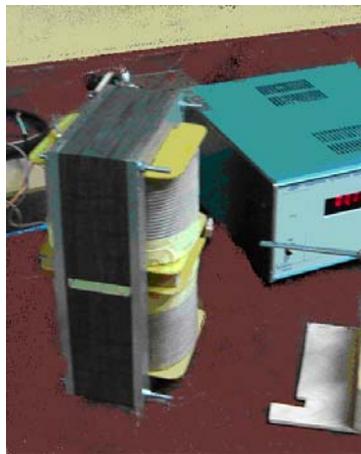
Справочная коэрцитивная сила – величина отрицательной напряженности магнитного поля H_c , необходимая для доведения до нуля намагниченности в предварительно намагниченном до насыщения материале. Коэрцитивную силу H_c определяют, обычно, на образцах замкнутой формы (т.е. без воздушных зазоров). Но для этого требуется специальная методика и аппаратура. С достаточной степенью точности H_c можно определить по измерениям остаточной намагниченности образца с малым воздушным зазором, если его размагничивающим фактором можно

пренебречь. Это выполняется, если длина силовой линии по железу $L_{жс}$ много больше высоты h_3 зазора и высота зазора меньше его поперечных размеров. Практически, это условие для дипольного магнита. Интерес представляет и коэрцитивная сила, когда образец имеет разный уровень намагниченности.

Для таких измерений была изготовлена модель диполя из отштампованных пластин, применяемых для стандартных трансформаторов с сердечниками Ш-40. Сечение модели и общий вид показаны на рис. 1а, 1б.



а)



б)

Рис. 1. Модель для измерения свойств стали.

Длина сердечника 64 мм. В боковые зазоры плотно вставлялись вставки из той же стали.

Сердечник собирался из пластин, отштампованных стандартно вдоль проката или из отштампованных поперек проката, из не отожженных и отожженных пластин. Отжиг производился при температуре 800°C в течение нескольких минут. Сердечник с отожженными пластинами был проверен на ускоренное старение – 150 часов при температуре 120°C.

Необходимо было как проверить справочные данные, так и получить коэрцитивную силу для других направлений силовых линий к направлению проката.

Методика измерений следующая.

1. Сердечник размагничивался переменным током 50 Гц с плавным уменьшением тока до нуля в продолжение ~2 минут. При более быстром процессе полного размагничивания не происходило.
2. Проводилось 5 циклов постоянным током $I \rightarrow 0 \rightarrow I$. Ток контролировался.

3. После циклов при токе I_i измерялось поле B_i в центре зазора.
4. Ток занулялся (источник отсоединялся от магнита). Измерялось остаточное поле B_i^0 в центре зазора. Установившийся процесс, в пределах точности измерений, наблюдался после 5 циклов, пункт 2.
5. Пункты 3, 4 повторялись несколько раз.
6. Пункты 1–5 проводились при следующих возрастающих значениях тока намагничивания I_i .

Расчеты 3-D модели на программе MERMAID позволили внести поправки в значения измеренного поля B_i в зазоре для получения B_i в железе. Программа также подтвердила, что в сердечнике выбранной формы четко выделяются превалирующие участки с направлением силовых линий вдоль и поперек проката. Был пройден диапазон намагничивающего поля в железе от 50 до 12500 Гс.

С хорошим приближением можно записать в системе CGSM:

$$H_{i\parallel c} * L_{\parallel} + H_{i\perp c} * L_{\perp} = B_i^0 * h_3, \quad (3)$$

где $H_{i\parallel c}$ и $H_{i\perp c}$ – коэрцитивные силы вдоль и поперек направления проката после намагничивающего поля B_i , L_{\parallel} и L_{\perp} – длины силовых линий по соответствующим участкам, B_i^0 – остаточное поле в зазоре высотой h_3 .

Для сердечника с продольным направлением проката $L_{\parallel} = 44h_3$, $L_{\perp} = 13h_3$, для сердечника с поперечным направлением проката $L_{\parallel} = 12h_3$, $L_{\perp} = 45h_3$. Совместная обработка измерений на двух типах отожженных сердечников дала следующие значения коэрцитивной силы, показанные на рис. 2, в зависимости от намагничивающего поля.

Коэрцитивная сила в зависимости от намагничивания.

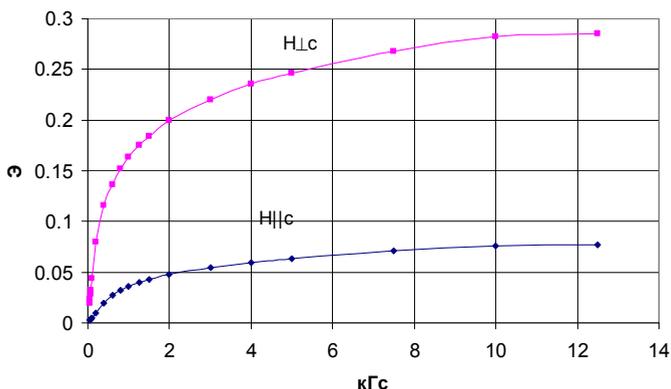


Рис. 2. Коэрцитивная сила.

Максимальное значение $H_{||c}$ равно 6.1 А/м (0.076 Э), $H_{\perp c} - 22.4$ А/м (0.28 Э). Справочное значение коэрцитивной силы $H_{||c}$ вдоль направления проката 6 А/м.

Отжиг уменьшал $H_{||c}$ и $H_{\perp c}$ примерно на 25%. От ускоренного старения в пределах точности измерений эффект не обнаружен.

Коэрцитивная сила в направлении наименьшего намагничивания (55°) примерно на 10% больше $H_{\perp c}$, что следует из справочных данных по удельным потерям при 50 Гц.

Хорошее совпадение справочных данных и результатов измерений и их обработки подтверждают правильность выбранной методики, которая может быть применена для испытаний других типов электротехнических сталей.

Магниты проектируются с применением этих результатов. Из рисунка 2 видно, что малую остаточную намагниченность можно получить, если индукция в ярме будет малой – $0.1 \div 0.2$ кГс. Но это означает, что габаритные размеры ярма должны быть в $\sim 10 \div 15$ раз больше характерного размера горизонтальной апертуры (~ 1 м). Второй вариант – иметь возможность доводить индукцию в ярме до $6 \div 8$ кГс. При этом остаточная намагниченность ярма будет изменяться мало при различных циклах работы. Это вариант принят для реализации.

4. Модели магнитов

Изготовленные модели магнитов показаны на рисунках 3, 4, 5, 6.

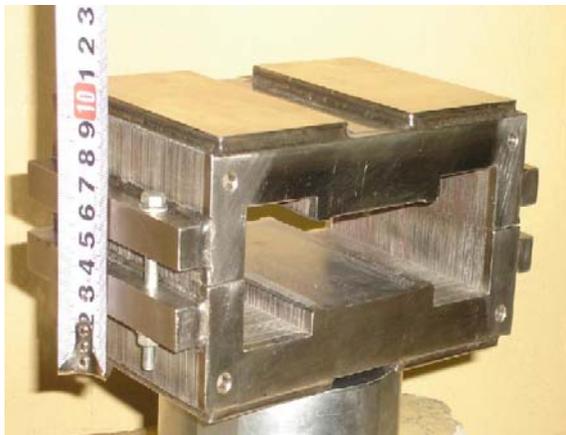


Рис. 3. Ярмо H-образное.



Рис. 4. H-образный магнит.



Рис. 5. Ярмо С-образное.



Рис. 6. С-образный магнит.

Предварительно нарезаются пластины с определенной ориентацией по направлению проката. Пластины сжимаются и закрепляются сваркой пластинами из немагнитной стали. Полученные пакеты обрабатываются на фрезерном станке. Пакеты отжигались. Ядро С-образное имеет сменную часть. Длина ярем 120 мм. Обмотки возбуждения не охлаждаются, но обеспечивают возможность магнитных измерений. Катушки Н-образного магнита имеют по 238 витков, С-образного – 123 витка.

5. Методика измерений

Измерения топографии магнитного поля производились датчиками Холла. На общем основании закреплено 11 датчиков (линейка датчиков). Расстояние между соседними датчиками (кроме крайних) 5 мм, крайние на расстоянии 2.1 мм, так что весь измеряемый диапазон 44.2 мм. Датчики устанавливались в середине апертуры магнита и не перемещались во время полного цикла измерений. Средняя квадратичная погрешность датчиков по внутренней сходимости 0.04 Гс при 10÷20-кратном опросе при установленном поле. Абсолютная калибровка датчиков, не сохраняющаяся длительное время (часы, дни) не очень существенна, так как измеряется изменение топографии поля. Чувствительность датчиков только не должна изменяться при непрерывных измерениях одного типа магнита (~0.5 часа).

Перед измерением магниты размагничивались переменным током. При первом подъеме поля ядро намагничивалось по основной кривой намагничивания, смотри рис. 7.

Частная петля гистерезиса

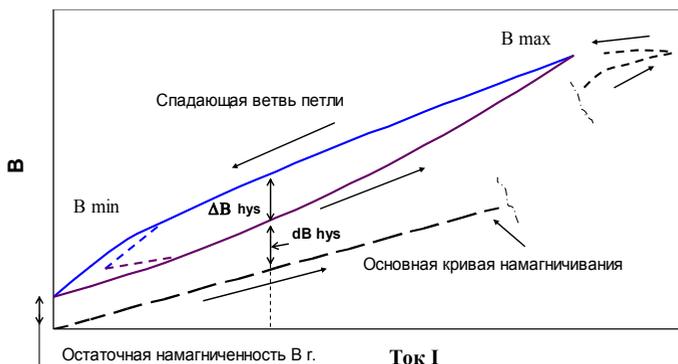


Рис. 7. Частная петля гистерезиса.

Измерялась топография поля при разных B (I).

Затем выполнялись различные циклы по частным петлям гистерезиса. Измерялась топография поля на спадающих и возрастающих ветвях петель при одном и том же токе. Частные петли гистерезиса проходились как от $I=0$, так и при минимальных номинальных значениях $B_{\min}=0.1$ кГс, 0.2 кГс до максимальных номинальных значений $B_{\max} = 1$ кГс, 1.4 кГс, 1.6 кГс. Циклы выполнялись от двух до шести раз.

Ток дополнительно измерялся с высокой точностью по омическому шунту. Вводилась поправка на повторяемость уровня тока, так как используемый источник MPS-20-100 обеспечивал стабилизацию тока, но не его уровень с необходимой точностью.

6. Результаты измерений

Наиболее полные результаты представлены для C-образного магнита со вставкой с направлением проката перпендикулярно силовым линиям. Этот магнит представляет наибольший практический интерес для дальнейшей деятельности.

6.1. H-образный магнит

На рисунке 8 показано 1/4 сечения магнита с топографией силовых линий. Видно, что в сердечнике нет преимущественного направления силовых линий. Поэтому сердечник собран вперемешку из пластин, вырезанных в двух перпендикулярных направлениях относительно направления проката. Положительный эффект от такой сборки был получен при исследовании образцов стали.

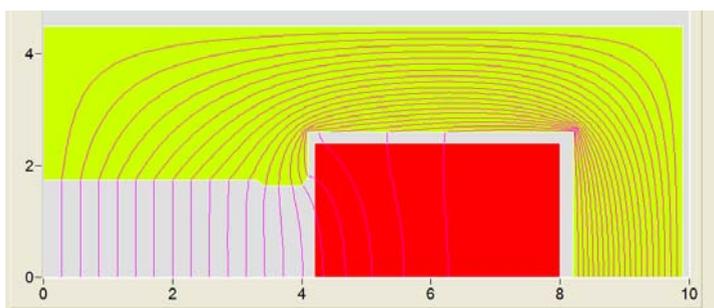


Рис. 8. Распределение магнитного потока.

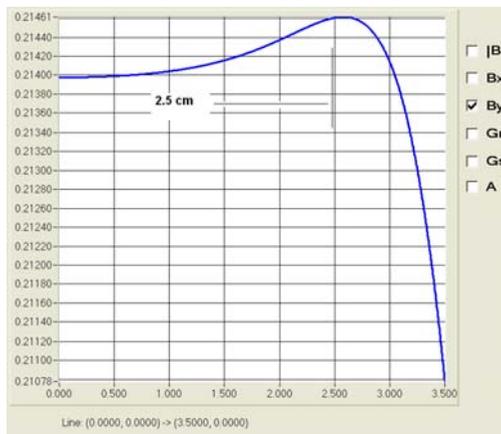


Рис. 9. Распределение поля.

На рис. 9 показано вычисленное распределение индукции в области ± 3.5 см с учетом фактических размеров модели. Из рис.9 и расчетов видно, что дальнейшая точная доработка шимов (0.1-0.2 мм) легко даст качество поля, определенное в [2]. Это относится и к С-образному магниту. Дальнейшие результаты измерений приведены для области ± 2.5 см.

На рис. 10 показаны результаты расчетов и измерений при номинальном поле 1.4 кГц. Топография поля при других номинальных значениях (от 0.2 до 1.6 кГц) отличается от приведенной незначительно, в пределах ошибок измерений.

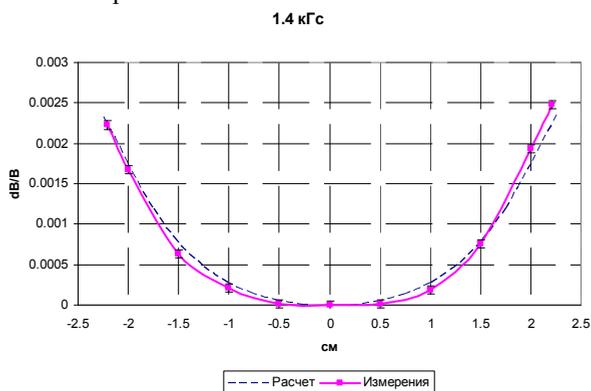


Рис. 10. Результаты расчетов и измерений.

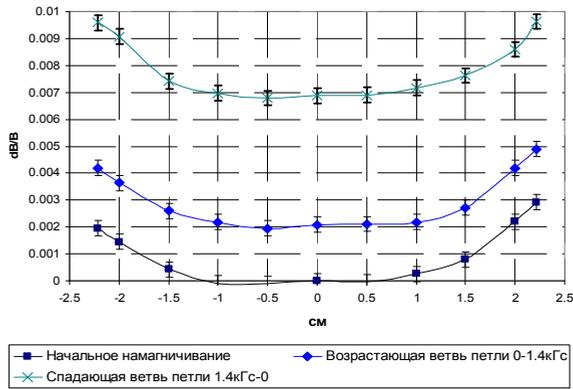
При различных уровнях и циклах намагничивания определялась относительная топография поля:

$$dB_i/B = (B_i - B_0)/B_0, \quad (4)$$

где B_0 – поле при начальном намагничивании в точке 0 см. При этом измеренные величины B_i содержали ΔB_{hist} – высоту петли гистерезиса и dB_{hist} – отличие в поле при начальном намагничивании и по растущей петле гистерезиса, смотри рис. 7.

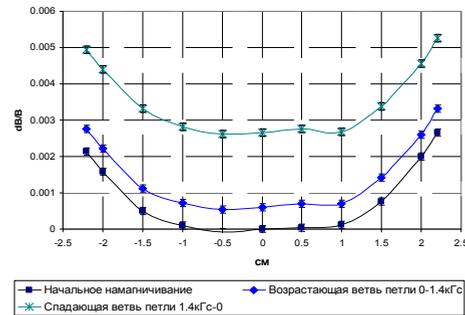
Циклы намагничивания были следующие: размагниченное состояние $\rightarrow 1.4$ кГс $\rightarrow (I=0) \rightarrow 1.4$ кГс $\rightarrow (I=0) \rightarrow$ и т.д. несколько раз и циклы 0.2 кГс $\rightarrow 1.4$ кГс $\rightarrow 0.2$ кГс $\rightarrow 1.4$ кГс $\rightarrow \dots$. Поля измерялись при 0.2 кГс, 0.7 кГс и 1.4 кГс. Некоторые результаты приведены на рисунках 11а),б),в).

0.2 кГс



а)

0.7 кГс



б)

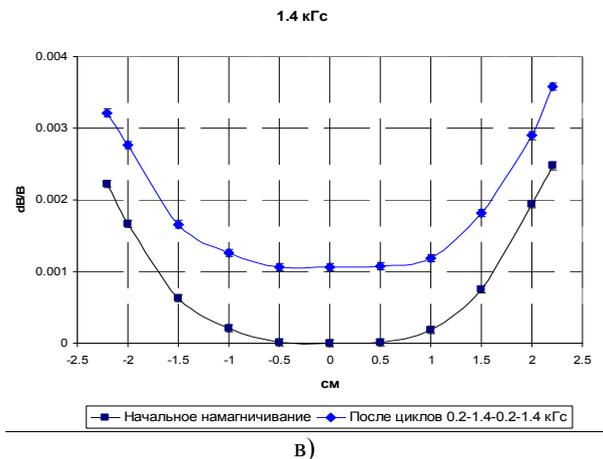


Рис. 11. Топография поля при различных циклах и уровнях.

Из совмещения графиков получено, что относительная топография поля одинакова при различных циклах и уровнях поля с точностью $\pm 1 \cdot 10^{-4}$, что лежит в пределах ошибок измерений. Изменялся только уровень поля на $(\Delta B_{hist} + dB_{hist})/B_0$ или на dB_{hist}/B_0 . Для этих величин получено: $\Delta B_{hist} = 0.8$ Гс при $B = 0.2$ кГц и $\Delta B_{hist} = 1.4$ Гс при $B = 0.7$ кГц; $dB_{hist} = 0.4$; 0.4 ; 1.6 Гс при $B = 0.2$; 0.7 ; 1.4 кГц соответственно. Остаточная намагниченность $B_r = 1.0$ Гс, как показано на рис. 12.

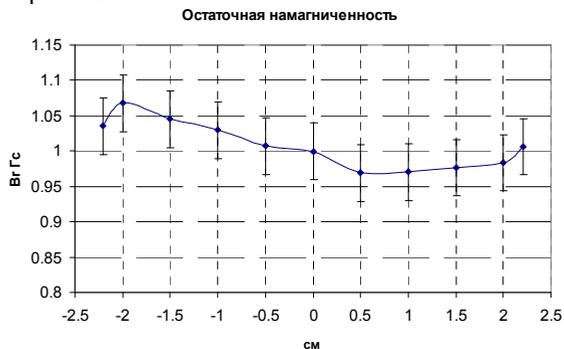


Рис. 12. Остаточная намагниченность.

При других номиналах B и других циклах намагничивания получены аналогичные результаты.

Повторяемость уровня поля. После полного размагничивания выполнялось 5 циклов $0.13 \rightarrow 1 \rightarrow 0.13$ кГс. Затем 20 циклов с измерениями минимального (инжекция) и максимального поля (эксперимент). Получен результат:

$$B_{\min} = 139.33 \pm 0.032 \text{ Гс}, \quad B_{\max} = 1035.33 \pm 0.06 \text{ Гс},$$

Т.е. относительная повторяемость уровня поля лучше, чем $\pm 5 \cdot 10^{-4}$ ($\pm 2\sigma$) при инъекции и $\pm 1.2 \cdot 10^{-4}$ при эксперименте.

6.2. С-образный магнит

На рис. 13 показано 1/2 сечения магнита с топографией силовых линий. Из рисунка видно, что в сердечнике два участка с преимущественным направлением силовых линий. Верхний участок был изготовлен из пластин с горизонтальным направлением проката. Замыкающая съёмная часть ярма изготовлена в двух вариантах: с направлением проката перпендикулярно силовым линиям (С-образный \perp) и вдоль них (С-образный \parallel).

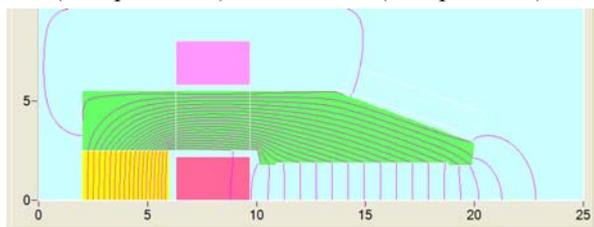


Рис.13. Распределение магнитного потока.

На рис. 14 показано вычисленное распределение индукции в области 8.5 см с учетом фактических размеров модели. Дальнейшие расчеты и результаты измерений приведены для области ± 2.5 см.

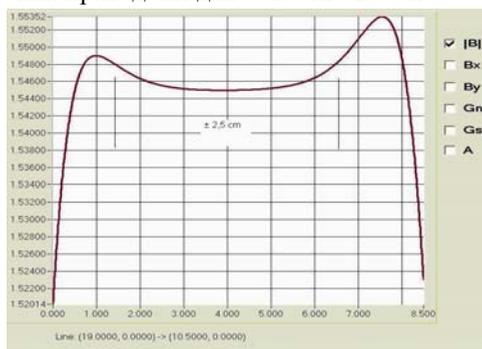


Рис. 14. Распределение поля.

6.2.1. С-образный ⊥

На рисунках 15а),б) показано соответствие расчетов и результатов измерений при номинальных полях 0.2 и 1.5 кГцс.

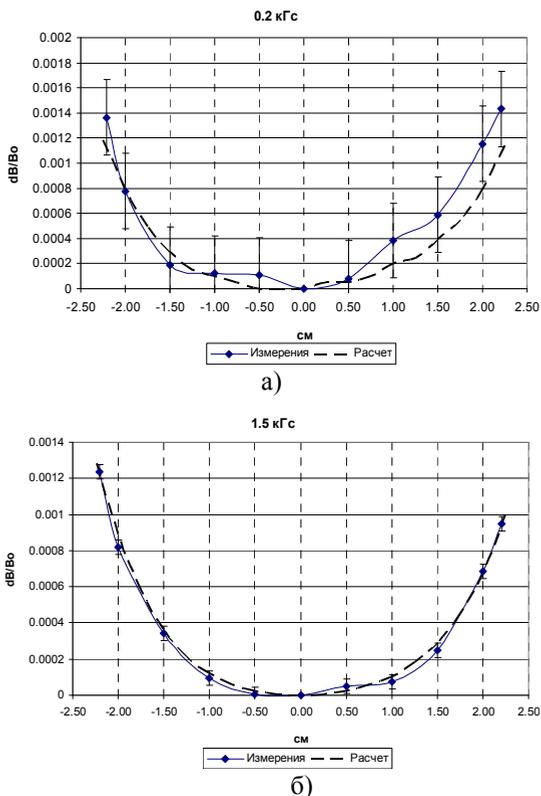
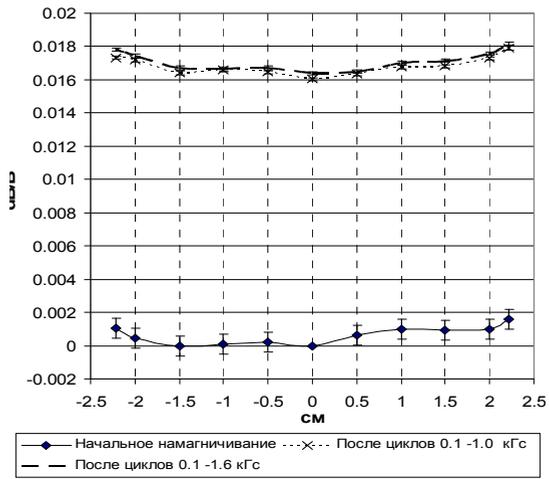


Рис. 15. Результаты расчетов и измерений.

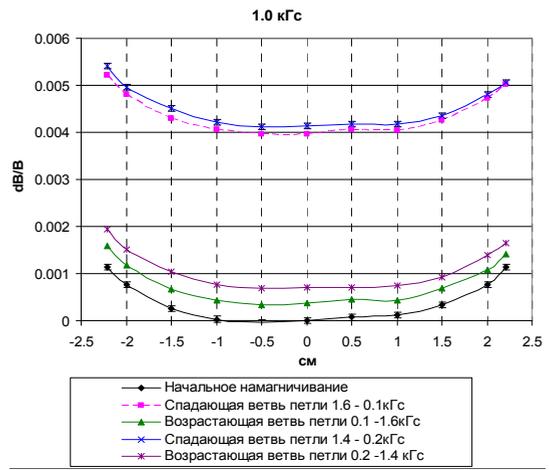
В диапазоне ± 2 см относительная однородность поля не хуже $\pm 5 \cdot 10^{-4}$, что соответствует требованиям [2]. Аналогичные результаты получены и при других номиналах поля.

Далее проведены измерения при различных циклах намагничивания. В циклах изменялись значения V_{\min} и V_{\max} (см. Рис. 7). Выполнены циклы: $V_{\min} = 0.1$ кГцс $\rightarrow V_{\max} = 1.0$ кГцс; $V_{\min} = 0.1$ кГцс $\rightarrow V_{\max} = 1.6$ кГцс; $V_{\min} = 0.2$ кГцс $\rightarrow V_{\max} = 1.4$ кГцс. Каждый цикл выполнялся несколько раз. “Стабилизация” полей (в пределах ошибки измерения) наступала после трех-четырех циклов.

На рисунках 16а),б) показаны некоторые результаты по относительной топографии поля согласно (4), на рис. 17 – качество поля с исключением смещения его уровня (без ΔB_{hist} и dB_{hist}).



а)



б)

Рис. 16. Относительная топография поля.

На рис. 17 приведена топография для промежуточного и экстремальных измеренных значений полей. При других значениях полей и других циклах аналогичные графики совпадают с приведенными в пределах ошибок измерений. На рисунке приведены характерные погрешности только для отдельных точек. Градиент поля не наблюдается.

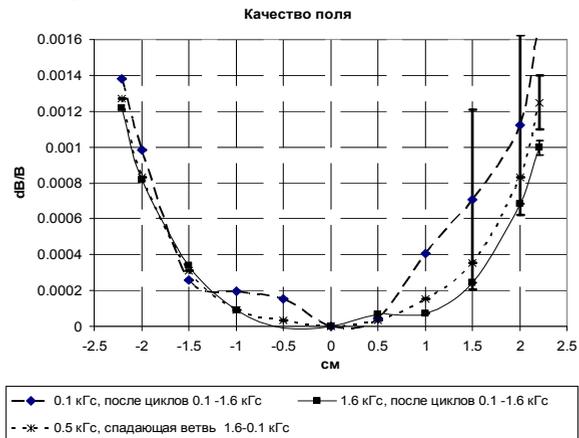


Рис. 17. Качество поля.

На рис. 18 показана остаточная намагниченность B_r . В отдельном эксперименте получено, что B_r не увеличивается при росте B_{\max} до 2 кГс. Это подтверждает, что $H_{|c}$ и $H_{\perp c}$ близки к предельным значениям, смотри рис. 2.

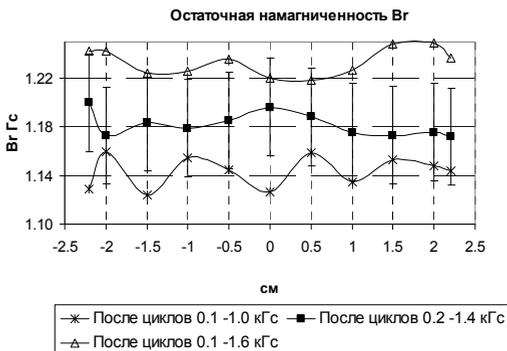


Рис. 18. Остаточная намагниченность.

Для предполагаемого первоначально рабочего цикла $B_{\min} = 0.2$ кГс \rightarrow $B_{\max} = 1.4$ кГс при $B = 1.0$ кГс $\Delta B_{\text{hist}} = 3.3$ Гс, $dB_{\text{hist}} = 0.7$ Гс. Остаточная намагниченность $B_{r, \max} = 1.23$ Гс.

Повторяемость уровня поля. После полного размагничивания выполнялось 5 циклов нормализации $0.13 \rightarrow 1 \rightarrow 0.13$ кГс. Затем 20 циклов с измерениями минимального (инжекция) и максимального поля (эксперимент), аналогично, как для H-образного магнита. Получен результат:

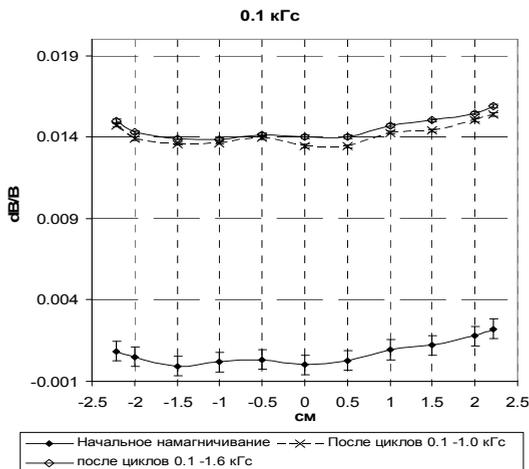
$$B_{\min} = 133.70 \pm 0.025 \text{ Гс}, \quad B_{\max} = 984.30 \pm 0.06 \text{ Гс},$$

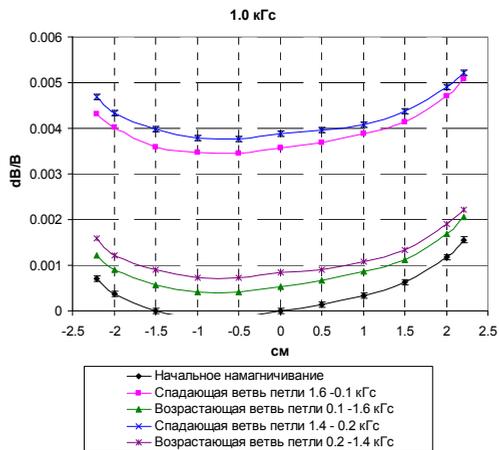
т.е. относительная повторяемость уровня поля лучше, чем $\pm 4 \cdot 10^{-4}$ ($\pm 2\sigma$) при инжекции и $\pm 1.2 \cdot 10^{-4}$ при эксперименте.

6.2.2. С-образный II

Для С-образного II магнита были сделаны аналогичные измерения и получены схожие результаты. Некоторые из них показаны на рисунках 19а), б), 20, 21.

Относительная топография сохраняется неизменной в пределах ошибок измерений при различных циклах и уровнях поля. Сам характер кривых отличается от С-образного I магнита некоторой асимметрией. Объясняется это тем, что сменная часть ярма для этого магнита была изготовлена с клиновидностью ≈ 0.04 мм.





б)

Рис. 19. Относительная топография поля.

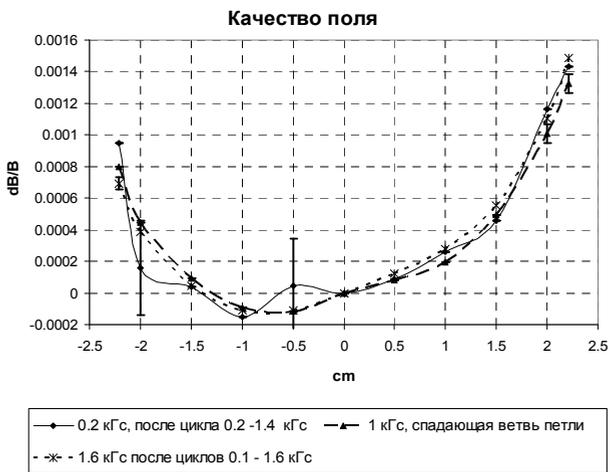


Рис. 20. Качество поля.

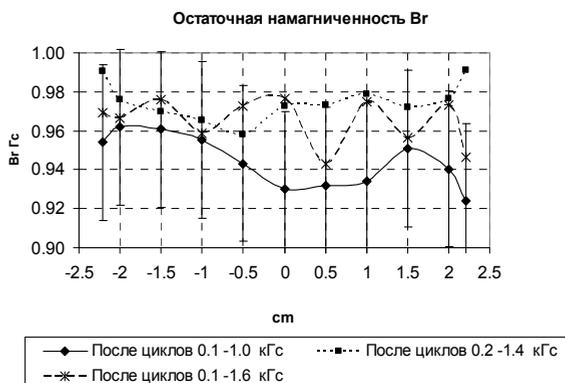


Рис. 21. Остаточная намагниченность.

Отличие С-образного \parallel от С-образного \perp магнита состоит в меньшем значении величин ΔB_{hist} , dB_{hist} , $B_{r\max}$. Частные петли гистерезиса уже и ближе к основной кривой намагничивания. Для предполагаемого рабочего цикла $B_{\min}=0.2$ кГс \rightarrow $B_{\max}=1.4$ кГс $\Delta B_{hist} = 2.9$ Гс при $B=1.0$ кГс, $dB_{hist} = 0.8$ Гс. Остаточная намагниченность $B_{r\max} = 0.97$ Гс.

7. Выводы

В таблице сведены некоторые результаты испытаний.

Тип магнита	$B_{r\max}$ Гс	ΔB_{hist} Гс при $B=1$ кГс	dB_{hist} Гс	Сохранение качества поля	Особенности при реализации
Н-образный	1.0	2.2	0.7	ОК	Проблема с вакуумной камерой
С-образный \perp	1.23	3.3	0.9	ОК	Предпочтителен при производстве
С-образный \parallel	0.97	2.9	0.8	ОК	Сложнее в производстве.

Выбранный тип стали и конструкции магнитов обеспечивают сохранение топографии магнитного поля при рабочих циклах. Малая остаточная намагниченность не приводит к появлению градиента поля, наблюдаемому в [4]. С-образный \perp и С-образный \parallel магниты отличаются по остаточным полям незначительно. Измеренная остаточная намагниченность $B_{r\max}$ хорошо соответствует расчетам по (3) и данным из графиков рис. 2.

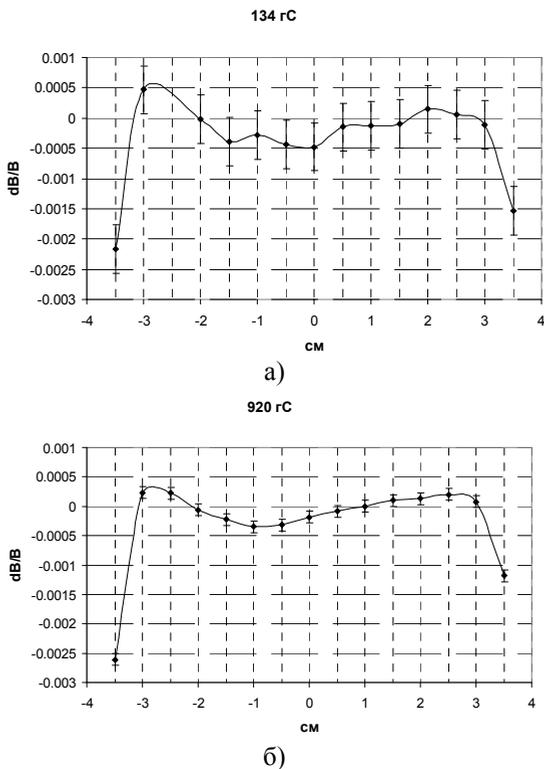


Рис. 22. Качество поля после доработки шимов.

После того, как были получены положительные результаты по возможности использования выбранной стали, была произведена доработка шимов для С-образного \perp магнита. Результаты измерений показаны на рисунках 22а),б).

Из графиков видно, что качество поля в диапазоне ± 2 см не хуже, чем $\pm 2.5 \cdot 10^{-4}$ и в диапазоне ± 3 см не хуже, чем $\pm 5 \cdot 10^{-4}$. Это параметры лучше, чем изложены в [2]. Следовательно, может быть уменьшена полюсная часть магнита или магнит длиной 14.7 м (по начальной версии) может быть прямым. Учитывая уменьшение максимального поля в ~ 1.5 раза [4], остальные размеры магнита и обмотки, а, следовательно, и погонный вес также могут быть уменьшены.

8. Рекомендации

В связи с вышеизложенным, предлагается рассмотреть следующую конструкцию магнита. Выбирается С-образный \perp магнит, рис. 23.

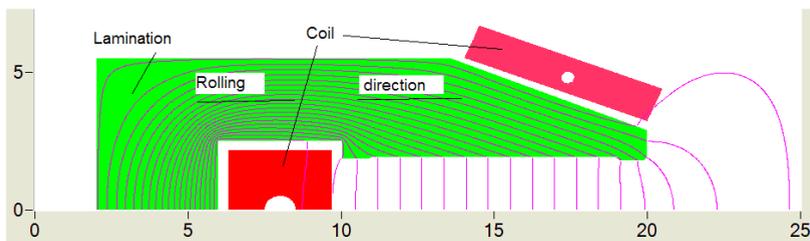


Рис. 23. Предложенная конструкция магнита.

Ярмо магнита имеет симметричные верхнюю и нижнюю половинки. Пластины штампуются в виде, как показано на рис. 23. Половинки скрепляются шпильками, проходящими через замыкающую часть ярма, как на С-образных моделях. Катушка имеет один виток внутри ярма и две параллельно соединяемых по току ветви вне ярма. Такая конструкция компактна, имеет минимальные поля рассеяния (следовательно – минимальную индуктивность). Изоляция медного проводника неорганическая, плазменное напыление окиси алюминия; стойкая к радиации. Крепления проводника также из неорганических изоляционных материалов. Такая изоляция необходима из-за высокого радиационного фона от СИ.

- Погонный вес магнита ~ 160 кг/м (~ 120 кг/м в модифицированной версии, обозначенной далее *).
- Ток максимальный ~ 4 кА (2.6 кА *).
- Погонная индуктивность 0.045 мГн/м.
- Погонная тепловая мощность 385 Вт/м (162 Вт/м*) при максимальном поле.

Для магнита длиной ~ 15 м (5.45 м *):

- Индуктивность ~ 0.7 мГн (0.24 мГн *).
- Падение напряжения на одном проводнике 0.72 В (0.17 В*) при максимальном поле.

Для магнита длиной ~ 15 м при перепаде давления 4 атм. перепад температуры охлаждающей воды $\sim 10^\circ\text{C}$.

Такой магнит может состоять из четырех прямых участков. Салитта ~ 1 мм. Участки соединяются под углом. При опоре (подвеске) каждой

четверти магнита в точках наименьшего прогиба жесткость конструкции обеспечит максимальный прогиб ~ 0.1 мм.

Для коммутации между магнитами возможно использовать шины от LEP (если сохранились).

Модели могут быть оптимизированы для диполей модифицированной версии.

9. Заключение

BINP готов к дальнейшему сотрудничеству с CERN по проектированию и изготовлению дипольных магнитов LHeC. Некоторые результаты этой работы были представлены в [3,7].

Автор выражает благодарность Сошилову А.Н. за помощь в изготовлении моделей и Гурову Д.С. за помощь в магнитных измерениях.

Литература

- [1] F. Willeke, F. Bordry, H. Braun, M. Klein, et al. A storage ring based options for the LHeC. - EPAC-08. 2008. - <http://www.ep.ph.bham.ac.uk/exp/LHeC/papers/ringring-EPAC08.pdf>.
- [2] D. Tommasini with contributions from K.H. Mess and J. Jewett. MEMORANDUM. Considerations on the main dipoles for a 70 GeV electron synchrotron for the LHeC. - Geneva, 23 July, 2009.
- [3] D. Tommasini. Update on LHeC Magnet Work. - [LHeC machine design meeting](#), 31 August, 2010. <http://indico.cern.ch/categoryDisplay.py?categId=1874>.
- [4] LEP Design report, Vol.II, p.53; CERN-LEP/84-01.
- [5] Холоднокатаные электротехнические стали. // Справочник. /Под редакцией Б.В. Молотилова, Москва, 1989.
- [6] С.В. Вонсовский, Я.С. Шур. Ферромагнетизм. // Москва – Ленинград, 1948.
- [7] M. Klein. Report on the Design Concepts for the LHeC. ECFA-10. - <http://www.ep.ph.bham.ac.uk/exp/LHeC/talks/klein.ecfa10.pdf>.

Содержание

1. Цель работы, исходные требования.....	3
2. Проблемы и предлагаемые решения	3
3. Свойства анизотропной электротехнической стали	4
3.1 Кривые намагничивания	4
3.2 Коэрцитивная сила. Остаточная намагниченность.....	6
4. Модели магнитов.....	9
5. Методика измерений.....	11
6. Результаты измерений	12
6.1. Н-образный магнит.....	12
6.2. С-образный магнит	16
6.2.1. С-образный \perp	17
6.2.2. С-образный \parallel	20
7. Выводы.....	22
8. Рекомендации	24
9. Заключение	25
Литература	25

Ю.А. Пупков, М. Кляйн, Д. Томмазини

**Модели дипольных магнитов для LHeC, CERN
из анизотропной электротехнической стали**

Yu.A. Pupkov, Max Klein, Davide Tommasini

**Models of dipole magnets for LHeC, CERN,
made of grain-oriented electric steel**

ИЯФ 2011-14

Ответственный за выпуск А.В. Васильев
Работа поступила 26.04. 2011 г.

Сдано в набор 28.04. 2011 г.
Подписано в печать 29.04. 2011 г.
Формат 60x90 1/16 Объем 1,8 печ.л., 1.5уч.-изд.л.
Тираж 105 экз. Бесплатно. Заказ № 14

Обработано на РС и отпечатано
на ротапринте «ИЯФ им. Г.И. Будкера» СО РАН,
Новосибирск, 630090, пр. Академика Лаврентьева, 11